

エネルギー吸収の整合性を考慮した応力-ひずみ関係の簡易なモデル

九州工業大学 学生会員〇谷井 健信

九州工業大学 正会員 高井 俊和

1. はじめに

構造物の耐震性を考えるとき、耐荷力とともにエネルギー吸収も重要な要素の一つである。著者らはこれまでに構造用鋼材の簡易な真応力-真ひずみモデルを検討してきた[1]。しかし、弾塑性変形によるエネルギー吸収の観点からのモデルの整合性は不明である。本研究では、FEM 解析を実施し、エネルギー吸収の観点から望ましい真応力-真ひずみモデル化の方法を確認した。

2. 応力-ひずみ関係と内部エネルギー

簡易なトリリニア型で応力-ひずみ関係をモデル化[1]した。公称応力 σ -公称ひずみ ε 関係と真応力 s -真ひずみ e 関係を図-1 に示す。鋼種は SM490Y を想定し、ヤング率 2.0×10^5 MPa, ポアソン比 0.3 とした。実際の鋼材の降伏点や引張強さは規格値より高めであることから、変動[2]を考慮した値とした。また、エネルギー密度 u -公称ひずみ ε 関係を図-1 に合わせて示す。エネルギー密度は、単位体積当たりの吸収エネルギーのことで、 σ - ε 関係を台形積分して求めた。

3. 解析ケース

本研究では解析ケースを 3 ケース設定した。各ケースで用いた真応力 s -真ひずみ e 関係を図-2 に示す。ケース①は降伏点以降の勾配を 0 とした完全弾塑性である。ひずみ硬化がなく、降伏以降の荷重が低めで安全側の結果が得られる。ケース②は著者らがこれまでの解析でよく用いてきた引張強さ以降の勾配を 0 としたケースである。ケース③は文献[1]に基づいた引張強さ以降の 3 次勾配も考慮したケースである。

4. 解析方法

解析プログラムは Abaqus 6.14 を使用し、材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮した弾塑性解析を行った。解析対象は文献[1]を参考に、材料試験で用いられる JIS 4 号試験片とした。図-3 に解析モデルの全体形状および境界条件を示す。試験片中央の平行部のうち、標点間の直径 14 mm, 長さ 50 mm の部分を、対称性を考慮して 1/8 をモデル化した。要素は 6 面体 1 次要素の 8 節点低減積分ソリッド要素(C3D8R 要素)を用い、要素サイズは 1.4 mm とした。

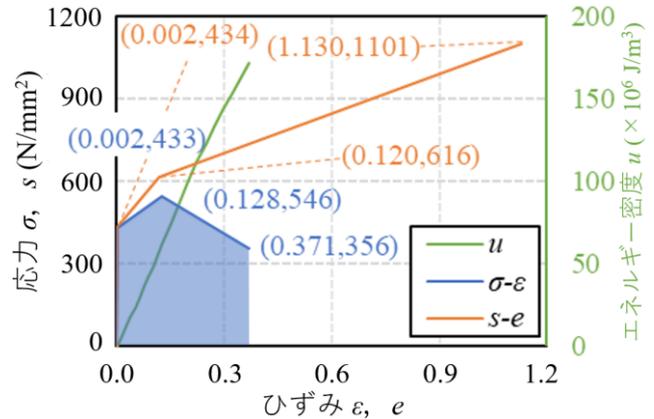
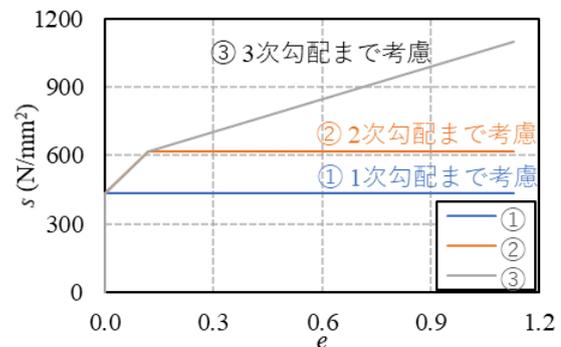
図-1 応力-ひずみ関係, u - ε 関係

図-2 各解析ケースの真応力-真ひずみ関係

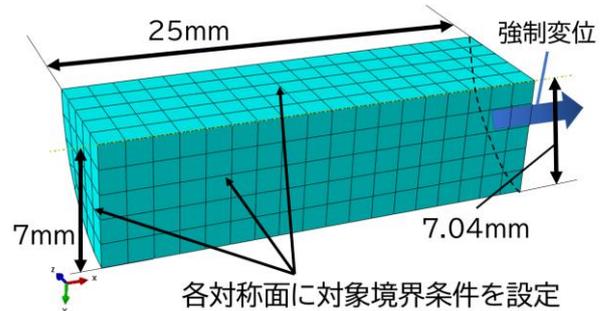


図-3 解析モデルの概要

材料特性は、図-2 の真応力 s -真ひずみ e を式(1)より真応力 s -塑性ひずみ e_p に変換して設定した。

$$e_p = e - s/E \quad (1)$$

ここで、 E : ヤング率(MPa)

境界条件として、各対称面に対称境界条件を設定し、端部に式(2)より得られた破断ひずみ時の標点伸びに相当する大きさの強制変位を与えて引張力を加えた。

$$l_0 \times \varepsilon_f = \frac{50}{2} \times 0.371 = 9.275 \text{ mm} \quad (2)$$

ここで、 l_0 : 標点距離, ε_f : 破断ひずみ(公称)

5. 解析結果

解析で得られた公称応力 σ -公称ひずみ ϵ 関係を図-4 に示す。モデルとは、図-2 の真応力 s -真ひずみ e 関係のもととなった図-1 の σ - ϵ 関係である。

ケース①は、降伏以降、応力が低下し引張強さ、破断の時点でモデルの応力よりそれぞれ 52.5%、75.4% 低くなった。ケース②は引張強さまでモデルと一致し、破断時の応力がモデルより 53.2% 低くなった。ケース③は引張強さから破断の間でモデルよりも応力が高くなったが、破断時点の応力の差 0.3% とほぼ一致した。

エネルギー E -変位 δ 関係を図-5 に示す。モデルは図-1 の σ - ϵ 関係の各軸に初期断面積と標点間距離をそれぞれ掛け合わせ、荷重 P -変位 δ 関係に変換し、台形積分して求めた。解析結果のエネルギー E は内部エネルギーのことであり、Abaqus の ALLIE により出力した。

なお、 σ - ϵ 関係と P - δ 関係は縮尺が異なるが相似であり、 u - ϵ 関係と E - δ 関係も同様である。

ケース②、③とも引張強さ以降でモデルとエネルギーに差が生じた。ケース②は破断時のエネルギーがモデルより 14.5% 低く安全側の評価が得られる。一方、ケース③は破断時点で 5% ほどエネルギーを過大に評価するが、モデルに最も近い結果が得られた。

図-6 に変形状態とミーゼス応力分布を示す。ケース②と③では、実挙動と同じく引張強さ以降でネッキングが生じた。一方、ケース①では降伏点以降でネッキングが生じた。

6. 考察およびまとめ

ケース①は降伏点まではモデルと整合し、それ以降は応力、エネルギーとも低く、安全側の評価を与える。しかし、引張強さの時点ですでにネッキングが生じたため、実際と異なる降伏、終局モードを与える可能性が示唆される。ケース②と③は引張強さまではモデルと整合し、ケース②は破断時に応力、エネルギーが低く安全側の評価が得られるが、高めとなったケース③の整合性が高かった。ケース②でもひずみ $\epsilon=0.2$ に相当する $\delta=10$ mm 前後までのエネルギーはモデルとおおむね整合した。

本研究の応力ひずみ関係は、引張方向の直応力をもとにモデル化したが、ネッキングが生じると 3 軸応力状態となる。この応力状態を考慮したモデル化を行うことで、引張強さ以降の応力やエネルギーの整合性が高くなると考えられる。

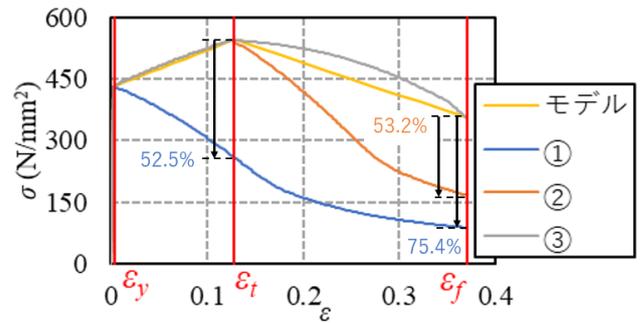


図-4 応力-ひずみ関係

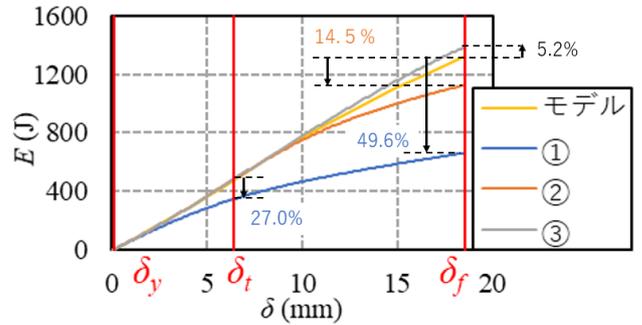
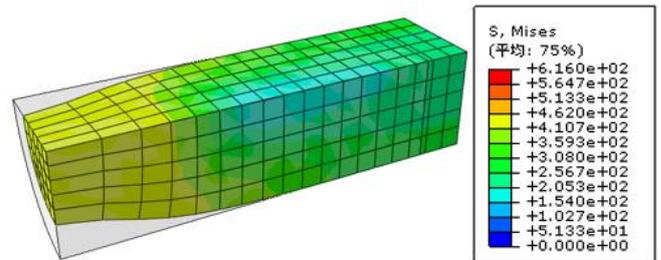
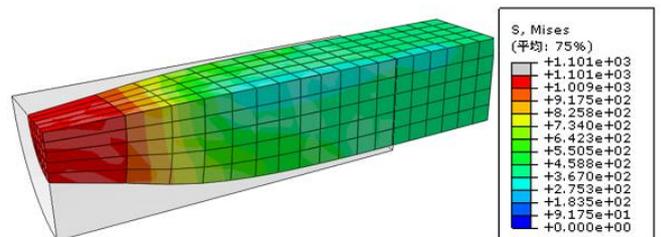


図-5 エネルギー-変位関係



(a) ケース① (引張強さ時)



(b) ケース③ (破断時)

図-6 変形状態とミーゼス応力分布

謝辞 本研究は JSPS 科研費 21K14233 の助成を受けたものです。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

[1] 大塚 貴広, 高井 俊和 : 破断を考慮した真応力-ひずみ関係の簡易なモデル化方法の 1 提案, 令和 3 年度土木学会土木学会第 76 回年次学術講演会講演概要集, I-39, 2 ページ, 2021.9
 [2] 土木学会 : 補修・補強のための高力ボルト摩擦接合技術 - 当て板補修・補強の最新技術 -, 鋼構造シリーズ 37, 第 1 版, 2021.11